

皖江城市带生态安全时空演化特征研究

房莉^{1, 2} 方凤满^{1, 2} 余健^{1, 2} 马康¹ 路曙光¹ 林跃胜^{1, 21}

(1. 安徽师范大学 地理与旅游学院, 安徽 芜湖 241003;

2. 江淮流域地表过程与区域响应安徽省重点实验室, 安徽 芜湖 241003)

【摘要】: 城市生态安全是保证城市资源可持续利用和区域可持续发展的基础和前提。皖江城市带是长江经济带“承东启西”的关键部位, 为促进皖江城市带生态环境与区域经济高质量协调发展, 采用 DPSR 模型构建生态安全评价体系, 利用熵权法与标准差系数法确定指标权重, 采用综合指数法、空间变差模型与灰色 GM(1, 1) 模型等方法分析了皖江城市带生态安全时空演变特征、影响因素与发展趋势。结果表明: (1) 皖江城市带生态安全综合指数随时间变化呈波动增长趋势, 研究时段内, 合肥生态安全指数年增长率最高, 为 1.14%, 马鞍山年增长率最低, 为 0.77%; (2) 南部的池州和宣城两市总体生态安全等级较高, 北部的滁州和合肥逐渐向理想安全等级转化, 中部的沿江城市马鞍山、芜湖、安庆和铜陵的生态安全处于较差等级; (3) 皖江城市带生态安全格局演化具有一定的延续性和规律性, 空间分异层次特征显著, 整体上呈现出从“南部>北部>中部”向“北部>南部>中部”的空间演变格局; (4) 驱动力与响应层指标对生态安全具有较好的推动作用; (5) 预测结果表明, 2020~2030 年皖江城市带生态安全重心将进一步向“西南-东北”格局转变。

【关键词】: 生态安全 时空演变 趋势预测 皖江城市带 DPSR 模型

【中图分类号】: P964; X826 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)07-1605-11

环境污染、气候变化、生态退化等众多生态问题给人类生存和社会发展带来了挑战^[1, 2]。生态安全研究备受关注^[3, 4, 5, 6], 国际应用系统分析研究所 (IIASA) 将生态安全定义为在人类生命、健康、福祉、基本权利、生计保障来源、必要资源、社会秩序和人类适应环境变化的能力等方面没有威胁的状态^[7]。肖笃宁等^[8]认为生态安全是人类赖以生存的环境处于健康与可持续发展状态, 也是人类社会经济系统与自然系统协调发展的综合目标。一般来说, 生态安全包括两部分: 生态系统结构安全和人类生存和发展安全, 其中生态系统安全是基础^[9], 原因是生态安全具有完整性、不可逆性和恢复期长的特征^[10], 这些特征直接受到生态系统变化的影响, 一旦扰动超过了生态系统自我恢复的阈值, 就可能出现不可逆的生态退化, 生态恢复需要很长时间和大量资金^[11]。此外, 局部生态破坏会造成整体生态影响^[12]。因此, 生态安全的本质是在不损害生态系统功能的前提下, 为人类社会的进步提供物质和服务。

由于生态系统类型不同、研究方向不同、学科背景不同, 生态安全评价的理论方法和指标体系也有所不同。目前, 生态安全评价的理论框架主要包括压力-状态-响应框架 Pressure-State-Response (PSR)^[13, 14, 15]、驱动力-压力-状态-响应框架 Driving force-Pressure-State-Response (DPSR)^[16, 17, 18]、驱动力-压力-状态-影响-响应框架 Driving force-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR)^[19, 20]、自然-经济-社会框架 Nature-Economy-Society (NES)^[21]、环境-经济-社会框架 Environment-Economy-

作者简介: 房莉(1978~), 女, 博士, 主要研究方向为生态环境保护与评价. E-mail: fangli3320@ahnu.edu.cn; 方凤满 E-mail: ffm1974@mail.ahnu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41977402); 安徽省高校工程技术研究中心重点项目(KJ2019A0508)

Society(EES)^[22]等。生态安全评价研究内容主要包括生态安全理论及指标体系研究^[23,24]、区域、流域生态安全评价^[25,26,27,28]、脆弱区生态安全的评价与建设^[29,30,31]以及土地生态安全评价^[32,33]等方面。生态安全评价方法已由最早的定性描述发展为如今的定量判断。综合指数模型是生态安全评价中较成熟的一种定量方法。

皖江城市带位于长江经济带“承东启西”的关键部位，随着长三角一体化建设的实施，皖江城市带社会经济快速发展，给生态安全带来极大压力，但目前对皖江城市带生态安全评价研究尚少。本研究构建基于 DPSIR 模型的区域生态安全评价指标体系，利用综合指数模型与空间变差函数等，探讨皖江城市带生态安全的时空变化特征、空间结构的变异特征以及影响因素；并利用灰色 GM(1, 1) 模型，预测其发展趋势，并提出优化策略，研究结果可为区域生态安全建设与管理提供信息支持。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

皖江城市带包含合肥、芜湖、马鞍山、铜陵、安庆、池州、滁州、宣城 8 市以及六安市的金安区和舒城县等 59 个县(市、区),总面积 7.6 万 km²,占安徽省国土面积的 54%。皖江城市带属于亚热带季风气候区,冬温夏热,降水充沛,年均温介于 13℃~20℃,年均降水量为 800~1600mm。2016 年,根据《国家发改委关于修订皖江城市带承接产业转移示范区规划的复函》要求,安徽省印发《皖江城市带承接产业转移示范区规划(修订)》版,为进一步推动中部地区崛起、参与长江经济带发展和“一带一路”建设发挥积极作用。由于皖江城市带承接产业转移示范区在六安的面积少,对区域整体生态安全评价作用较小,因此本文不包括六安市的金安区和舒城县,研究对象仅为皖江城市带 8 个地级市(图 1)。

1.2 数据来源

文中数据主要来源于相应年份的《中国城市建设统计年鉴》《中国城市统计年鉴》《中国区域统计年鉴》《安徽统计年鉴》、皖江城市带各市统计年鉴以及安徽省土地勘测规划院。部分数据通过年鉴数据转换得到。部分缺失的数据,通过数据的年变化率与相邻年份数据计算补齐。

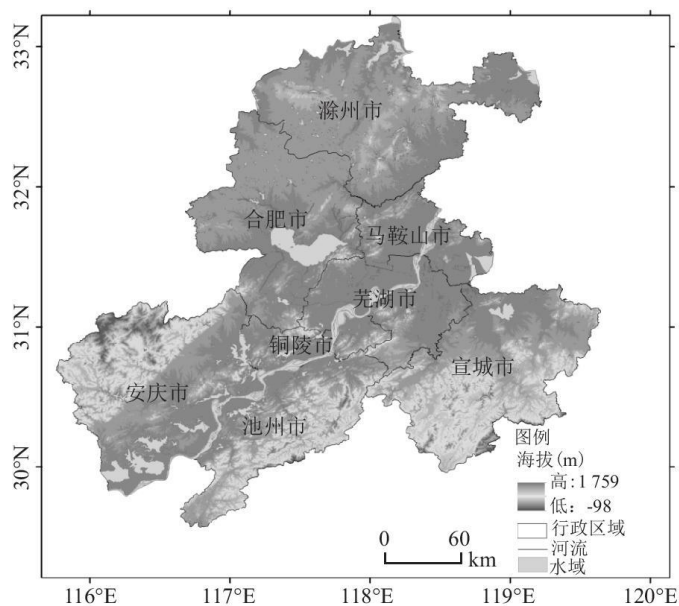


图 1 研究区地理位置

1.3 研究方法

1.3.1 评价指标体系选取与构建

遵循指标体系的科学性、可获得性、可比性与整体性等原则，通过国内外生态安全评价的区域性指标体系相关文献^[34,35]，并结合专家筛选从驱动力、压力、状态和响应 4 个方面构建生态安全评价指标体系(表 1)，并将指标性质分为成本型(-)和效益型(+), 驱动力指标表征经济与社会发展对环境的驱动力(C1~C4); 状态指标表征生态系统和环境质量(C5~C9); 压力指标表征社会发展对生态安全的影响(C10~C15); 响应指标表征政府在生态安全管理方面的政策和投资等(C16~C20)。

1.3.2 指标权重的确定

将熵权法^[25]和标准差系数法^[36]得到的权重对比分析，取其均值，得到更精确的综合权重^[37]。权重分配结果见表 1。20 个指标中，高于平均数 0.05 的指标有 6 个，其中，表征驱动力的指标 1 个，为 C4, 其综合权重为 0.0656; 表征自然与社会状态指标 1 个，为 C9, 其综合权重为 0.0532; 表征压力的指标 3 个，分别为 C10、C13 和 C15, 其综合权重值分别为 0.0518、0.056 和 0.0503; 响应指标 1 个，为 C18, 其综合权重为 0.1113。

1.3.3 综合指数法

综合指数法是根据各项评价指标数值的大小及对应的权重来对生态安全进行评价，具有优化归类指标和完全定量化的优点，能够得到较为定量和客观的分析结果。其模型如下所示：

表 1 皖江城市带土地生态安全评价指标体系与权重

目标层	准则层	指标	指标代码	单位	指标性质	指标表征	STDEV 权重	熵权	综合权重
生态安全	驱动力	人口自然增长率	C1	%	+	表征人口增长对生态安全的驱动	0.0376	0.0450	0.0413
		地区生产总值增长率	C2	%	+	表征经济发展对生态安全的驱动	0.0472	0.0382	0.0427
		人均 GDP	C3	元/人	+	表征经济发展对生态安全的驱动	0.0472	0.0463	0.0467
		人口城镇化率	C4	%	+	表征城市发展对生态安全的驱动	0.0573	0.0739	0.0656
	状态	建成区绿化率	C5	%	+	表征城市绿化状态	0.0255	0.0454	0.0354
		人均耕地	C6	hm ² /人	+	表征人均耕地资源状态	0.0539	0.0429	0.0484
		绿地面积	C7	km ²	+	表征城市绿地状态	0.0463	0.0342	0.0403
		人均水资源	C8	m ³ /人	+	表征人均水资源状态	0.0476	0.0257	0.0366
		森林覆盖率	C9	%	+	表征森林资源状态	0.0693	0.0370	0.0532

压力	单位耕地农药负荷	C10	kg/hm ²	-	表征农业经济对生态安全的压力	0.0564	0.0472	0.0518
	单位耕地肥料负荷	C11	kg/hm ²	-	表征农业经济对生态安全的压力	0.0380	0.0479	0.0430
	人均道路面积	C12	m ²	-	表征交通对生态安全的压力	0.0431	0.0486	0.0458
	人口密度	C13	人/km ²	-	表征人口对生态安全的压力	0.0718	0.0402	0.0560
	工业废水排放量	C14	t	-	表征工业对生态安全的压力	0.0485	0.0467	0.0476
	工业二氧化硫排放量	C15	t	-	表征工业对生态安全的压力	0.0533	0.0473	0.0503
响应	城市生活污水处理率	C16	%	+	表征对城市污水的处理水平	0.0442	0.0493	0.0468
	森林病虫害控制率	C17	%	+	表征对森林病虫害的防治水平	0.0442	0.0480	0.0461
	工业废水排放合格率	C18	%	+	表征对工业污水的处理水平	0.0827	0.1399	0.1113
	工业二氧化硫处理率	C19	%	+	表征对工业废气的处理水平	0.0531	0.0460	0.0495
	工业固体废弃物综合利用率	C20	%	+	表征对工业固体废弃物的处理水平	0.0327	0.0505	0.0416

$$S_i = \sum_{j=1}^m W_j X_{ij} \quad (1)$$

式中： S_i 为第*i*市的生态安全水平； W_j 为第*j*项指标的权重； X_{ij} 为第*i*市第*j*项指标的标准化数值。根据生态安全评价综合得分高低，依据自然断点法，建立本次生态安全分级标准与相应特征如下，见表2。

表2 生态安全分级表

安全状况	等级	特征
不安全	0~0.42	生态系统压力极大，生态系统结构不稳定
较不安全	0.43~0.48	生态系统压力较大，生态系统结构存在缺陷

临界安全	0.49~0.54	生态系统压力较大接近阈值，生态结构较为完整
安全	0.55~0.60	生态系统压力较小，生态系统结构较为完整
非常安全	>0.61	生态系统压力很小，生态功能、结构完整

1.3.4 空间变差模型

空间变差函数也称半变异函数，是解析空间变异规律和结构分析的有效手段，其函数表达式为：

$$\gamma(k) = \frac{1}{2N(k)} \sum_{i=1}^{N(k)} [Y(x_i) - Y(x_i + k)]^2 \quad (2)$$

式中： $Y(x_i)$ 和 $Y(x_{i+k})$ 分别是 $Y(x)$ 在空间单元 x_i 和 x_{i+k} 上的生态安全值； $N(k)$ 为分隔距离为 k 的样本量。

克里金(Krigin)插值是以空间变差模型为依据对随机过程进行空间建模和插值的一种模拟，在特定有限区域内，克里金能够给出最优线性无偏估计，其函数表达式如下：

$$Y(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Y(x_i) \quad (3)$$

式中： $Y(x_0)$ 为位置点； $Y(x_i)$ 为已知样本点； λ_i 为第 i 个样本点对位置点的权重； n 为已知点的个数。

1.3.5 灰色 GM(1, 1)模型

灰色 GM(1, 1)模型以不确定性系统为研究对象，通过对部分已知信息的生成、开发，提取有价值的信息，实现对系统演化规律的正确描述和有效监控。由于小样本、贫信息不确定性系统的大量存在，而灰色系统理论又具有建模时所需数据样本较少、计算简单且预测精度较高等特点^[38]，可用它来进行预测和评估生产、生活和科学研究等方面的相关问题。具体计算公式参考刘思峰等^[39]。

2 结果与分析

2.1 生态安全时空演变特征

2.1.1 生态安全时间序列变化特征

由图 2 可见，2007~2018 年，皖江城市带生态安全综合指数总体呈波动增长趋势。具体表现为，2007~2008 年，皖江 8 市生态安全指数处于上升阶段，其中铜陵生态安全指数增幅最大，由 2007 年的 0.3650 增大到 2008 年的 0.5054，增幅为 38.47%，其余 7 市增幅均较小，2008 年，8 市生态安全等级处于临界安全及其以下的城市占 75%。2008~2010 年，合肥、芜湖、马鞍山、铜陵和池州 5 市的生态安全综合指数均为先上升后下降，其中下降幅度较大的是芜湖和铜陵，分别由 2009 年的 0.4302 和 0.5564

下降到2010年0.3942和0.5389,降幅分别为8.36%和3.15%,而滁州、安庆和宣城处于缓慢增长趋势。2010年,8市生态安全等级处于临界安全及其以下的城市占50%。2010~2013年,除芜湖外,其余7市生态安全指数均处于下降趋势,芜湖生态安全指数从2010年的0.3942上升到2013年的0.4815,增幅为22.15%;生态安全综合指数下降的城市中,以安庆、宣城和铜陵下降幅度较大,分别为10.33%,7.19%和6.40%。2013年,8市生态安全等级处于临界安全及其以下的城市占75%,总的来说,2010~2013年皖江城市带生态安全水平处于不稳定状态。2013~2016年,皖江8市生态安全指数处于稳定上升阶段,2016年处于临界安全以上的城市占75%。2016~2018年,皖江8市生态安全指数均出现小幅波动下降,但生态安全等级并未发生较大变化,其中马鞍山由2016年的临界安全级别下降到2018年的不安全级别。其他城市基本维持在安全等级与非常安全等级;2018年临界安全等级以上的城市占87.5%。

评价期内,皖江8市生态安全综合指数值虽均有不同程度的提升,但各市改善的状况存在差异性(图3),以中位数为参照,8市生态安全综合指数排位顺序为池州>宣城>合肥>安庆>铜陵>滁州>芜湖>马鞍山,可见南部的宣城和池州,以及北部的合肥处于领先水平。以改善的进度来看,合肥在8市中年均增长率最高,为1.14%,生态安全优化进度优于其他7市;马鞍山年增长率最低,为0.77%,生态安全优化进度相对滞后,在评价期内,马鞍山的生态安全指数值相对较低。

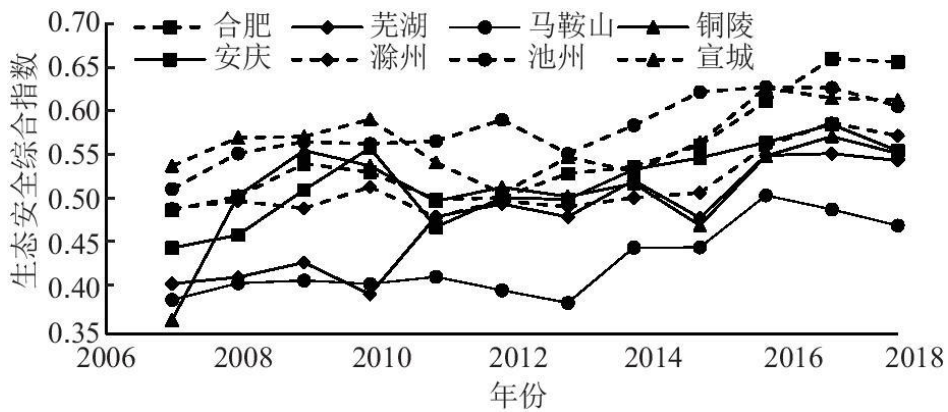


图2 2007~2018年皖江8市生态安全综合指数时间演变特征

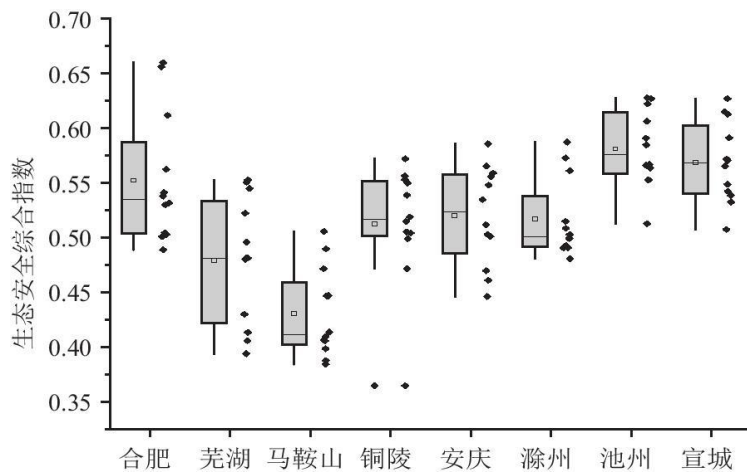


图3 2007~2018年皖江8市生态安全综合指数箱线图

2.1.2 生态安全类型空间变化特征

根据生态安全等级划分标准,用 ArcGIS10.2 绘制生态安全空间分布图(图 4)。2008~2012 年,城市带生态安全等级在空间上表现为南部优于中部和北部的分布特征,其中长江以北的滁州、合肥,中部沿江城市马鞍山、芜湖和铜陵均处于临界安全及其以下等级,而南部的宣城、池州以及西南的安庆生态安全等级多处于临界安全以上等级,这一阶段内,生态安全水平值最高为南部池州,达 0.6050,中部的沿江城市马鞍山生态安全值最低,为 0.4474。2014~2018 年,除了马鞍山处于较不安全等级外,其余 7 市生态安全等级大多有所提升,南部的池州和宣城,北部的滁州和合肥均处于安全等级及其以上级别,具有较高的生态安全指数值。中部的沿江城市马鞍山、芜湖、安庆和铜陵的生态安全等级波动较大,其安全等级在临界安全、较安全与不安全等级之间变化。从皖江 8 市生态安全等级空间变化类型看,区域内处于不安全等级的城市数量在减少,处于临界安全等级及其以上级别的城市在增加,生态安全水平处于向较高水平转变阶段。

2.1.3 生态安全格局演变的空间变差分析

以 2007~2018 年的皖江 8 市生态安全指数作为空间变量,用空间变差函数表达生态安全空间结构的变异特征。在赋予各区域单元几何中心点基础上,采用高斯、指数、球体和线性模型分别对变量数据进行拟合,选取拟合优度最高的模型(表 3),并采用克里金(Kriging)插值分析皖江 8 市生态安全水平的分布形态与差异特征,用 Sufes 软件对插值结果进行 3D 可视化表达,图 5 显示皖江 8 市 2007、2010、2013、2016 和 2018 年生态安全空间变差分析结果。

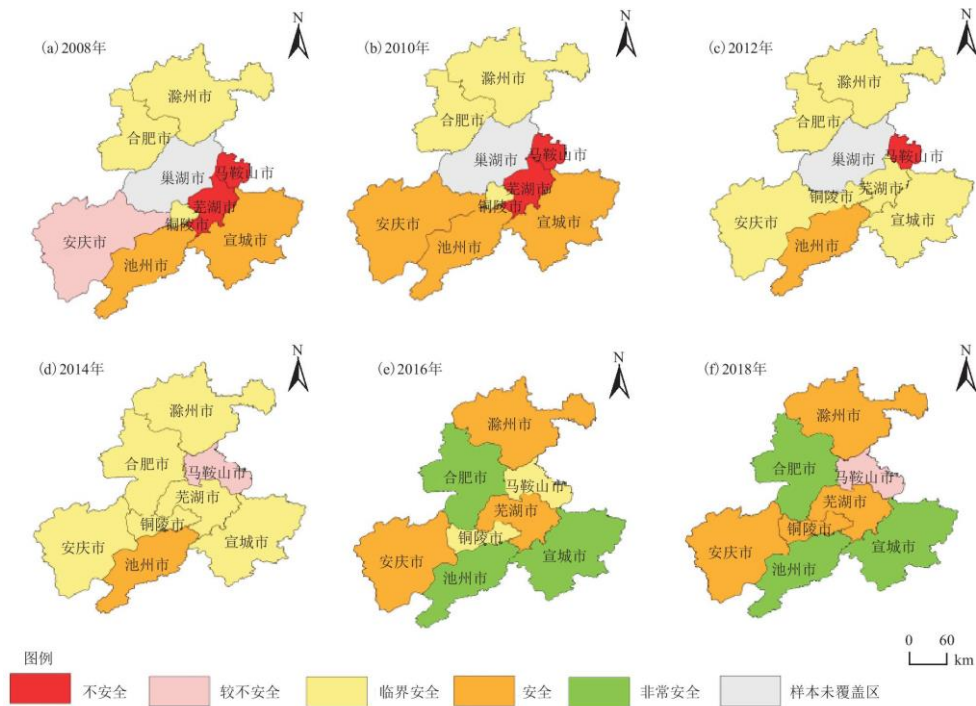


图 4 皖江城市带生态安全空间分布特征

表 3 皖江 8 市生态安全空间变差函数拟合参数

年份	拟合模型	块金值	基台值	块金系数	变程值	决定系数
2007	高斯	0.00001	0.00359	0.802	0.9215	0.742
2008	高斯	0.00001	0.00573	0.718	0.8591	0.669

2009	高斯	0.00001	0.00597	0.898	1.0843	0.844
2010	高斯	0.00001	0.00872	0.898	0.9751	0.780
2011	球状	0.00017	0.00245	0.982	0.3360	0.760
2012	线性	0.00310	0.03120	0.000	0.8439	0.962
2013	线性	0.00364	0.00364	0.000	0.8439	0.392
2014	线性	0.00141	0.00141	0.000	0.9439	0.773
2015	高斯	0.00010	0.00387	0.697	0.6755	0.515
2016	高斯	0.000001	0.00633	0.645	0.6703	0.760
2017	球状	0.000001	0.00833	0.542	0.5390	0.757
2018	球状	0.000004	0.00852	0.785	0.3850	0.714

从图 5 中可知：皖江城市带生态安全格局演化具有一定的延续性和规律性，空间分异层次特征较显著，整体上呈现出从“南部>北部>中部”向“北部>南部>中部”的空间演变格局，同时低值区域具有明显向中东部迁移现象。主要体现为：2007 年，南部及西南部地区形成以宣城、池州和安庆为“峰状”凸起结构，中东部地区为低谷区，北部等值线较为稀疏，表明其生态安全水平发展状况较为均衡；2010 年，南部与北部变化较为平稳，中部低值范围区趋于集聚；2013~2016 年，南部与西南部继续保持较好的峰体结构，北部等值线逐渐密集，趋于形成峰体，中部低谷区域依然存在，这一阶段北部的生态安全趋于向更好的级别转化；2018 年，北部地区的“峰状”结构开始凸显，南部与西南部峰体出现减弱现象，中部依然处于“低谷”地带。

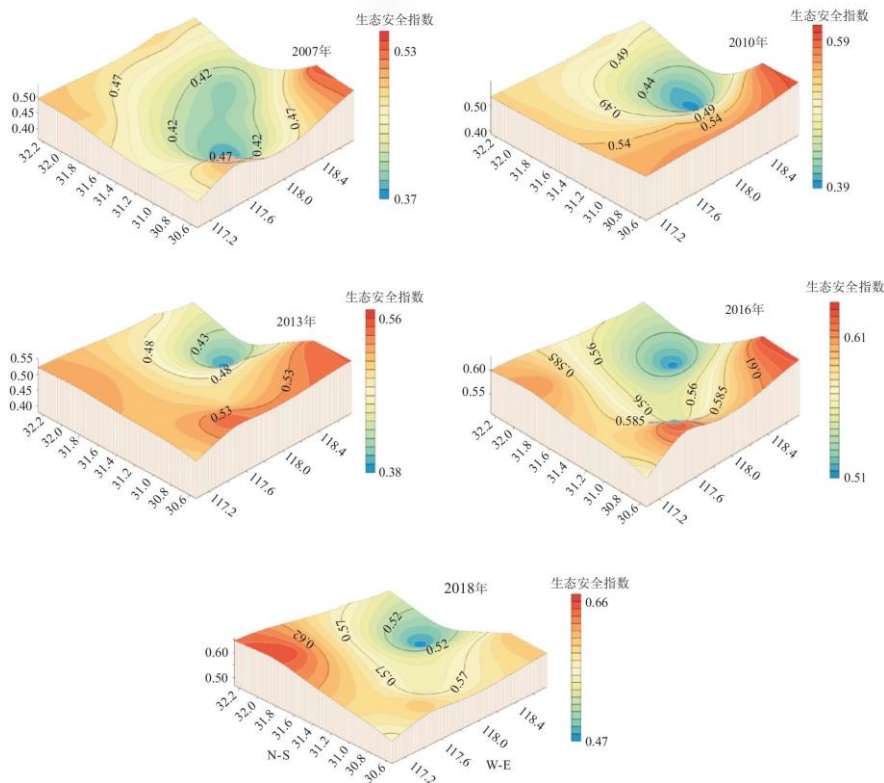


图 5 生态安全 Kriging 插值模拟

2.2 生态安全影响因素

识别生态安全的主导影响因素对维护生态安全及其保护政策的制定具有重要指导意义。由图 6 可见，驱动力层的生态安全指数中位值排序为合肥>铜陵>芜湖>马鞍山>滁州>池州>宣城>安庆；压力层生态安全指数中位值排序为宣城>池州>滁州>安庆>合肥>芜湖>铜陵>马鞍山；状态层生态安全指数中位值排序池州>宣城>滁州>安庆>合肥>铜陵>芜湖>马鞍山；响应层的生态安全指数中位值排序为安庆>铜陵>芜湖>合肥>池州>宣城>滁州>马鞍山；从准则层排序可以看出，铜陵和马鞍山的生态安全状态主要受到压力层和状态层的指标制约，马鞍山同时也具有较低的响应层指标；宣城、池州和安庆的生态安全状态主要受压力层和状态层的指标促进作用；合肥与芜湖的生态安全状态主要受驱动力和响应层的指标促进作用。合肥的驱动力、响应准则层具有较高的指数值，虽然压力与状态综合指数较低，但在研究时段内其生态安全等级提升较快，而马鞍山的压力准则层、状态准则层与响应准则层的指数值均较低，在评价期内生态安全等级一直较低，这表明驱动力与响应层的指标对生态安全具有较好的推动作用，这与崔馨月研究结果相似^[37]，说明分析结果具有一定的准确度。

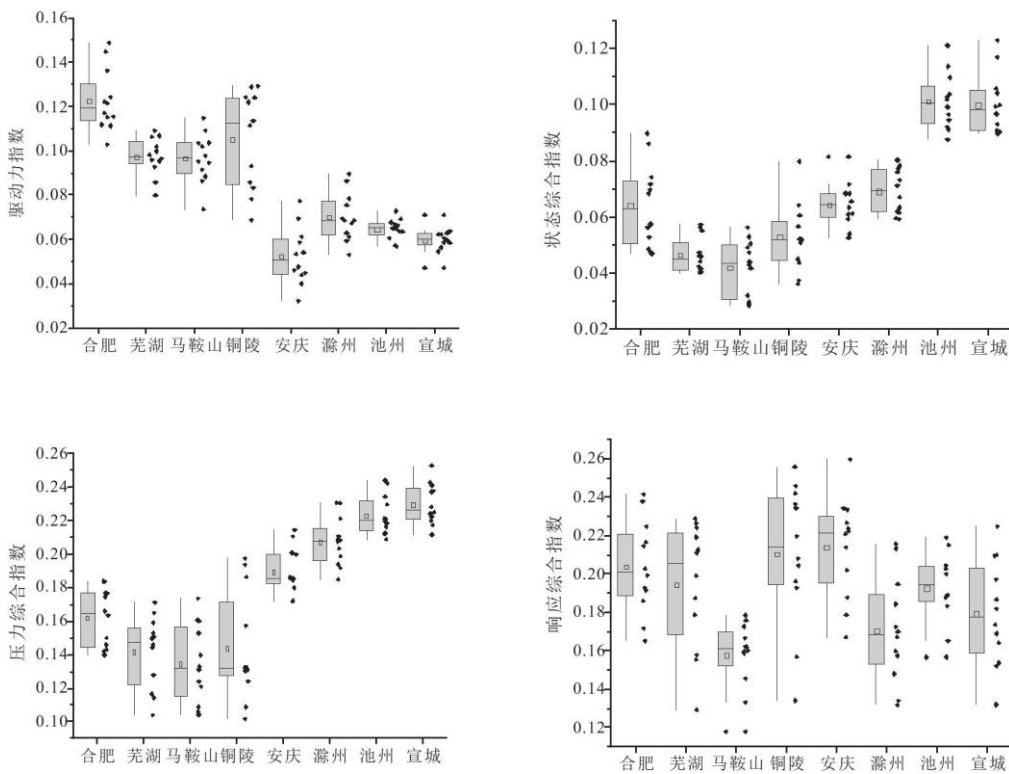


图 6 准则层指标对生态安全综合指数影响箱线图

2.3 生态安全空间格局预测

借助 Matlab2018a 软件，基于灰色 GM(1, 1) 模型，对皖江 8 市生态安全综合指数构建时间序列模型，并采用残差检验和后检验差检验法对预测结果进行检验。结果显示：5 个参数的平均相对误差、关联度、均方差比值与小误差概率的精度等级分别为 I 级、I 级、II 级、II 级，说明灰色 GM(1, 1) 模型的预测结果可信度较高。在此基础上，借助 Arcgis10.2 软件对已预测得出的 2020~2030 年生态安全指数进行可视化表达，其空间分布格局如图 7 所示。

预测结果显示：2020~2030年，皖江8市生态安全等级分布在3个安全等级：临界安全、安全和非常安全，生态安全重心将进一步向城市带外围扩散，空间分布上进一步向“西南-东北”格局转变。具体来看，2020年，皖江8市生态安全格局空间分异明显，苏皖交界的滁州以及沿江岸线城市马鞍山、铜陵、芜湖、安庆处以较低的生态安全等级，合肥、池州、宣城处于较高的生态安全等级，但2025年，除了马鞍山和铜陵生态安全等级较低，其余城市均稳定在非常安全等级，2030年，只有铜陵市处于低级别的生态安全等级，皖江其余城市均稳定在较高的生态安全等级。

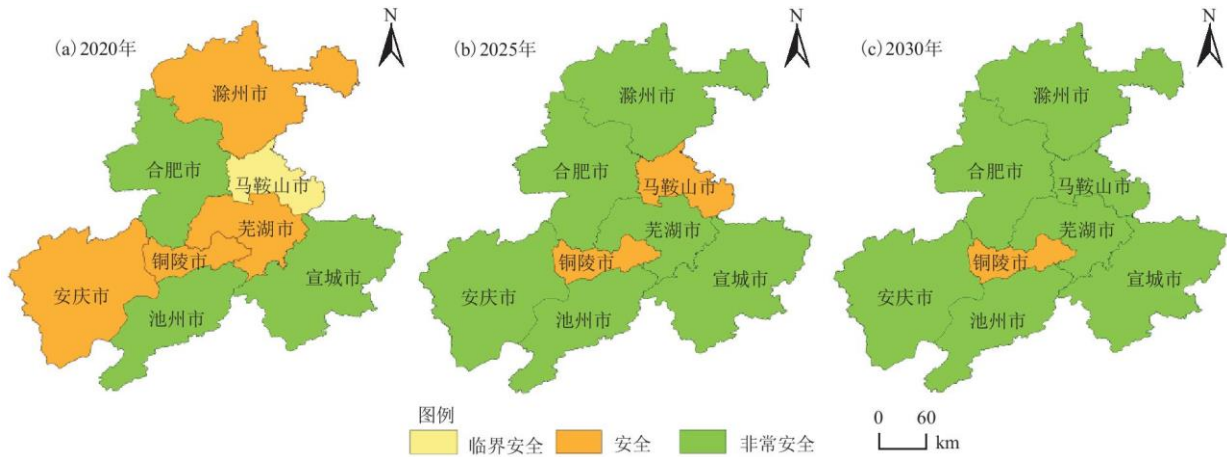


图7 皖江城市带生态安全空间格局预测

3 讨论

该区域生态安全水平在时间序列上的变化特征明显。具体表现为，2007~2013年间，该区域处于产业转移政策前期与实施发展初期，区域经济调整变化较快，工业与交通道路发展迅速，土地利用的调整与农业发展加快，给生态安全带来一定的压力，但该阶段的生态安全综合指数变化缓慢，可能与巢湖的行政区划调整引起的空间结构变化有关。从2014~2017年期间，随着产业转移稳定发展、国家与当地政府对生态安全与环境保护措施的出台，研究区域对生态环境的政策与资金投入逐渐加大，该阶段研究区生态安全水平整体出现提升趋势，但2018年该区域生态安全指数值出现下降趋势，意味着区域政策与投资对生态安全水平的初期恢复较为容易，但若恢复到更高质量的生态安全水平可能需要更合理的发展布局 and 更高水平的技术支撑。

生态安全与自然环境、社会经济变化息息相关。产业经济转移的实施和发展与各市的自然地理条件、区位条件、交通条件以及土地资源利用等密切相关。处于南部与西南部丘陵山地的宣城、池州和安庆，自然地理条件较为复杂多变，且多林地与山地，而交通发达的平原以及长江岸线便利的水运条件，是产业经济落地首选，因此省会城市合肥、长江岸线城市芜湖、马鞍山和铜陵以及东北部与江苏交界的滁州在产业经济转移实施过程中，占据重要的作用。因此，研究初期阶段，生态安全重心偏向西南部，但随着产业经济转移的力度逐渐加强，宣城、池州和安庆成为承接产业经济转移的第二梯队，到研究中期，皖江8市生态安全水平呈现下降的态势。研究后期，出现北部、南部和东部生态安全水平较好，而中部沿江城市生态安全偏低的态势，这说明，皖江8市中，地处平原与丘陵山地的生态环境压力得以缓解，而长江岸线城市的生态压力依然很大。

皖江城市带生态安全格局预测反映，生态安全的发展状态与城市的经济结构有一定的相似性，如马鞍山的钢铁工业、铜陵的有色金属工业，具有相似的经济结构，因而在生态安全的发展趋势上出现相似的状态。

4 结论与建议

本文从驱动力、压力、状态与响应4个维度构建生态安全评价指标体系，在定量测度皖江城市带的生态安全水平基础上，分

析其在时间和空间尺度上的演变特征，并预测其发展趋势，研究结论如下：

(1) 皖江城市带生态安全综合指数随时间变化呈波动增长趋势，8 市生态安全综合指数值均有不同程度的提升，在研究时段内，合肥的生态安全指数年增长率为 8 市最高，而马鞍山年增长率为最低，从准则层分析可见，研究区域的驱动力与响应准则层对生态安全具有较好的推动作用。

(2) 研究区南部的池州和宣城具有较高的生态安全等级，北部的滁州和合肥逐渐向理想安全等级转化，中部的沿江城市马鞍山、芜湖、安庆和铜陵的生态安全等级处于较差的等级，其安全等级在临界安全、较安全与不安全等级之间变化。

(3) 皖江城市带生态安全格局演化具有一定的延续性和规律性，空间分异层次特征显著，整体上呈现出从“南部>北部>中部”向“北部>南部>中部”的空间演变格局，同时低值区域具有明显的集聚性，表现为中东部出现明显的低谷区域。预测结果显示，2020~2030 年皖江城市带生态安全格局出现明显的空间差异性，城市带生态安全重心在空间分布上将进一步向“西南-东北”格局转变。

基于生态安全格局时空演变特征分析，提出以下建议：首先，合肥与芜湖的压力指标与状态指标因子风险较大，马鞍山的响应、状态与压力指标均具有一定风险，安庆的驱动力指标存在安全隐患，以上风险因素在后期开展生态安全治理时候应加以应对。其次，西北部合肥应发挥地区资金和人才优势，着力提升环保科技创新水平，支撑生态环境保护与修复工作；中部与西部地区应积极引进先进的环保理念与污染治理技术，加强生态环境保护宣传与教育，执行严格的负面清单管理，淘汰一批环境风险大的工矿企业。同时，构建生态安全信息监测系统，实现区域生态安全信息的有效沟通，减少空间效应对生态安全的制约和影响，以期将皖江城市带打造成为具有国家生态安全价值的高质量一体化发展区域。

参考文献:

- [1] MENG Q. The impacts of fracking on the environment: A total environmental study paradigm[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 580 (FEB. 15): 953-957.
- [2] LIU J, DIAMOND J. China's environment in a globalizing world[J]. *Nature*, 2005, 435 (7046): 1179.
- [3] HUANG Q, WANG R, REN Z, et al. Regional ecological security assessment based on long periods of ecological footprint analysis[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2007, 51 (1): 24-41.
- [4] LI Y, XIANG S, ZHU X, et al. An early warning method of landscape ecological security in rapid urbanizing coastal areas and its application in Xiamen, China[J]. *Ecological Modelling*, 2010, 221 (19): 2251-2260.
- [5] HU M, LI Z, YUAN M, et al. Spatial differentiation of ecological security and differentiated management of ecological conservation in the Pearl River Delta, China[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 104 (SEP.): 439-448.
- [6] CHU X, DENG X, JIN G, et al. Ecological security assessment based on ecological footprint approach in Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2017, 101: 43-51.
- [7] ROGERS K S. Ecological security and multinational corporations[J]. *Wwenvironmental change and security project report*, 1997, 3: 29-36.

-
- [8]肖笃宁, 陈文波, 郭福良. 论生态安全的基本概念和研究内容[J]. 应用生态学报, 2002, 13(3):354-358.
- [9]SHI Y,LI J,XIE M.Evaluation of the ecological sensitivity and security of tidal flats in Shanghai[J]. Ecological Indicators,2018, 85(FEB.):729-741.
- [10]RAMESH S,KAPLANA K.Ecological integrity and environmental protection for Vijayawada region - Scattered Eastern Ghats[J]. International Journal of Sustainable Built Environment,2015, 4:109-116.
- [11]ROY E D.Phosphorus recovery and recycling with ecological engineering:A review[J]. Ecological Engineering, 2017, 98(1):213-227.
- [12]TIAN J,GANG G.Research on Regional Ecological Security Assessment[J]. Energy Procedia,2012, 16(Part B):1180-1186.
- [13]李建春, 袁文. 基于 GIS 格网模型的银川市土地生态安全评价研究[J]. 自然资源学报 2017, 32(6):988-1001.
- [14]FAN Y,FANG C.Evolution process and obstacle factors of ecological security in western China,a case study of Qinghai province[J]. Ecological Indicators,2020, 117(6):106659.
- [15]LI Z T,LI M,XIA B C.Spatio-temporal dynamics of ecological security pattern of the Pearl River Delta urban agglomeration based on LUCC simulation[J]. Ecological Indicators,2020, 114,106319.
- [16]张玉泽, 任建兰, 刘凯, 等. 山东省生态安全预警测度及时空格局[J]. 经济地理, 2015, 35(11):166-171, 189.
- [17]顾玉娇. 基于 DPSIR 的战略环境评价指标体系构建及实证[D]. 复旦大学, 2010.
- [18]WANG F,GU N.Impact of ecological security on urban sustainability in Western China—A case study of Xi'an[J]. Environment and Planning B Urban Analytics and City Science,2020:239980832093186.
- [19]徐少葵, 左逸帆, 章牧. 基于模糊物元模型的中国旅游生态安全评价及障碍因子诊断研究[J]. 地理科学, 2021, 41(1):33-43.
- [20]JAGO ON K,KANEKO S,FUJIKURA R,et al.Urbanization and subsurface environmental issues:An attempt atDPSIRmodel application in Asian cities[J]. Science of the Total Environment,2009, 407(9):3089-3104.
- [21]王晶, 原伟鹏, 刘新平. 哈尔滨城市土地生态安全时序评价及预测分析[J]. 干旱区地理, 2018, 41(4):885-892.
- [22]柳思, 张军, 田丰, 等. 2005-2014 年疏勒河流域土地生态安全评价[J]. 生态科学, 2018, 37(3):114-122.
- [23]马克明, 傅伯杰, 黎晓亚. 区域生态安全格局: 概念与理论基础[J]. 生态学报, 2004(4):761-768.
- [24]左伟, 周慧珍, 王桥. 区域生态安全评价指标体系选取的概念框架研究[J]. 土壤, 2003(1):2-7.

-
- [25]WU X,LIU S L,SUN Y X,et al.Ecological security evaluation based on entropy matter-element model:A case study of Kunming city southwest China[J].Ecological Indicators,2019,102(7):469-478.
- [26]LIU C X,WU X L,WANG L.Analysis on land ecological security change and affect factors using RS and GWR in the Danjiangkou Reservoir areaChina[J].Applied Geography,2019,105:1-14.
- [27]MOA RR AB Y,SALEHI E,AMIRI M J,et al.Spatial-temporal assessment and modeling of ecological security based on land-use/cover changes (case study:Lavasanat watershed)[J].International Journal of Environmental Science and Technology,2021:1-16.
- [28]GHOSH S,CHATTERJEE N D,DINDA S.Urban ecological security assessment and forecasting using integrated DEMATEL-ANP and CA-Markov models:A case study on Kolkata Metropolitan Area,India[J].Sustainable Cities and Society,2021,68:102773.
- [29]郭利刚,冯珍珍,刘庚,等.基于物元模型的汾河流域土地生态安全评价[J].生态学杂志,2020,39(6):2061-2069.
- [30]孙鸿烈,郑度,姚檀栋,等.青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J].地理学报,2012,67(1):3-12.
- [31]LI J X,CHEN Y N,XU C C,et al.Evaluation and analysis of ecological security in arid areas of Central Asia based on the emergy ecological footprint (EEF) model[J].Journal of Cleaner Production,2019,235(OCT.20):664-677.
- [32]黄烈佳,杨鹏.长江经济带土地生态安全时空演化特征及影响因素[J].长江流域资源与环境,2019,28(8):1780-1790.
- [33]李春燕,南灵.陕西省土地生态安全动态评价及障碍因子诊断[J].中国土地科学,2015,29(4):72-81.
- [34]王雪微,范大龙.长三角城市群城市发展质量测度及时空演变格局[J].人文地理,2020,35(6):85-94.
- [35]YANG R,DU W,YANG Z.Spatio-temporal Evolution and Influencing Factors of Urban Land Ecological Security inYunnanProvince[J].Sustainability.2021,13,2936.<https://doi.org/10.3390/su13052936>.
- [36]任彩凤,程艳妹,郑欣,等.基于均方差决策法的淮北市生态承载力评价[J].生态科学,2019,39(5)168-177.
- [37]崔馨月,方雷,王祥荣,等.基于 DPSIR 模型的长三角城市群生态安全评价研究[J].生态学报,2021,41(1):302-319.
- [38]许泽东,柳福祥.灰色 GM(1,1)模型优化研究进展综述[J].计算机科学,2016,43(S2):6-10.
- [39]刘思峰,郭天榜,党耀国.灰色系统理论及其应用[M].北京:科学出版社,2010.